

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengerinan

2.1.1 Konsep Dasar Pengerinan

Pengerinan merupakan proses pengurangan kadar air suatu bahan hingga mencapai kadar air tertentu. Dasar proses pengerinan adalah terjadinya penguapan air bahan ke udara karena perbedaan kandungan uap air antara udara dengan bahan yang dikeringkan. Agar suatu bahan dapat menjadi kering, maka udara harus memiliki kandungan uap air atau kelembaban yang lebih rendah dari bahan yang akan dikeringkan (Treyball, 1981). Definisi lain dari proses pengerinan yaitu pemisahan sejumlah kecil air atau zat cair lain dari suatu bahan, sehingga mengurangi kandungan zat cair tersebut. Pengerinan biasanya merupakan langkah terakhir dari sederetan operasi dan hasil pengerinan biasanya siap untuk dikemas (McCabe dkk, 1993).

Secara umum proses pengerinan terdiri dari dua langkah proses, yaitu penyiapan media pengering (udara) dan proses pengerinan bahan. Penyiapan media dilakukan dengan memanaskan udara yang dapat dilakukan dengan pemanasan alam (matahari, panas bumi) atau buatan (listrik, pembakaran kayu, arang, batubara, gas alam dan bahan bakar minyak) (Kudra dan Mujumdar, 2002). Prinsip pengerinan biasanya akan melibatkan dua kejadian, yaitu panas harus diberikan pada bahan yang akan dikeringkan dan air harus dikeluarkan dari dalam bahan. Dua fenomena ini menyangkut perpindahan panas ke dalam dan perpindahan massa keluar.

Faktor yang dapat mempengaruhi pengerinan suatu bahan adalah:

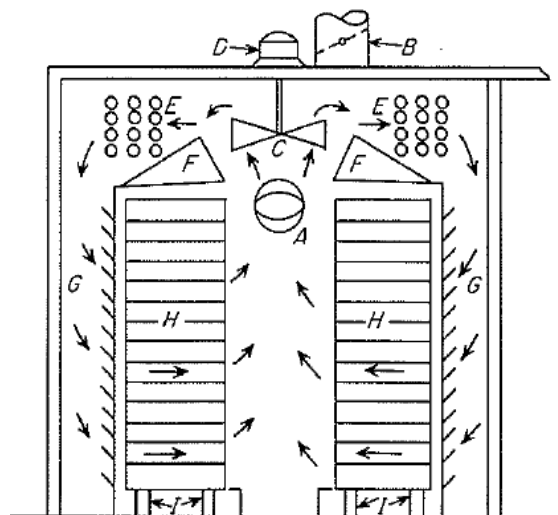
1. Sifat fisik dan kimia dari bahan, meliputi bentuk, komposisi, ukuran, dan kadar air yang terkandung di dalamnya.
2. Pengaturan geometris bahan. Hal ini berhubungan dengan alat atau media yang digunakan sebagai perantara pemindah panas.

3. Sifat fisik dari lingkungan sekitar alat pengering, meliputi suhu, kecepatan sirkulasi udara, dan kelembaban.
4. Karakteristik dan efisiensi pemindahan panas alat pengering.

2.1.2 Jenis-jenis Alat Pengering

1. *Tray Dryer*

Pengering baki (*tray dryer*) disebut juga pengering rak atau pengering kabinet, dapat digunakan untuk mengeringkan padatan bergumpal atau pasta, yang ditebarkan pada baki logam dengan ketebalan 10-100 mm. Pengeringan jenis baki atau wadah adalah dengan meletakkan material yang akan dikeringkan pada baki yang langsung berhubungan dengan media pengering (Octaria, 2015). *Tray dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



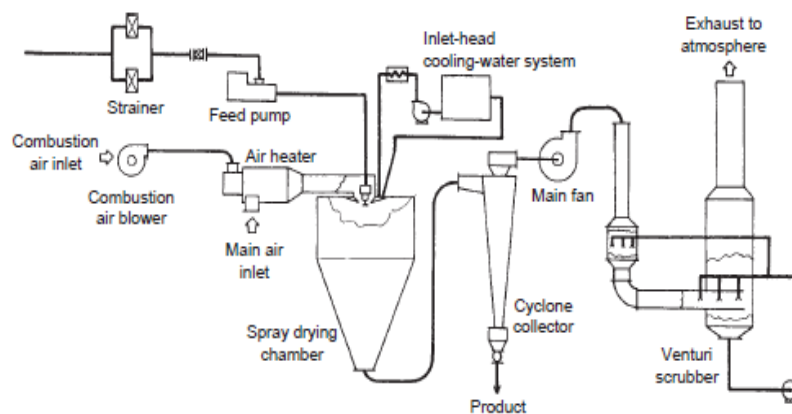
(Sumber: McCabe dkk, 1993)

Gambar 2.1 *Tray Dryer*

Prinsip kerja pengering *tray dryer*, yaitu dapat beroperasi dalam keadaan vakum dan dengan pemanasan tak langsung. Uap dari zat padat dikeluarkan dengan *ejector* atau pompa vakum. Pengeringan zat padat memerlukan waktu sangat lama dan siklus pengeringan panjang, yaitu 4-8 jam per *batch*. Selain itu dapat juga digunakan sirkulasi tembus, tetapi tidak ekonomis karena pemendekan siklus pengeringan tidak akan mengurangi biaya tenaga kerja yang diperlukan untuk setiap tumpak (Octaria, 2015).

2. *Spray Dryer*

Pengeringan semprot (*spray dryer*) merupakan jenis pengering yang digunakan untuk menguapkan dan mengeringkan larutan dan bubur (*slurry*) sampai kering dengan cara termal, sehingga didapatkan hasil berupa zat padat yang kering. Pengeringan semprot dapat menggabungkan fungsi evaporasi, kristalisator, pengering, unit penghalus dan unit klasifikasi. Penguapan dari permukaan tetesan menyebabkan terjadinya pengendapan zat terlarut pada permukaan. *Spray drying* ini menggunakan atomisasi cairan untuk membentuk droplet, selanjutnya droplet yang terbentuk dikeringkan menggunakan udara kering dengan suhu dan tekanan yang tinggi. Dalam pengering semprot, bubur atau larutan didispersikan ke dalam arus gas panas dalam bentuk kabut atau tetesan halus (Octaria, 2015). *Spray dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.2.

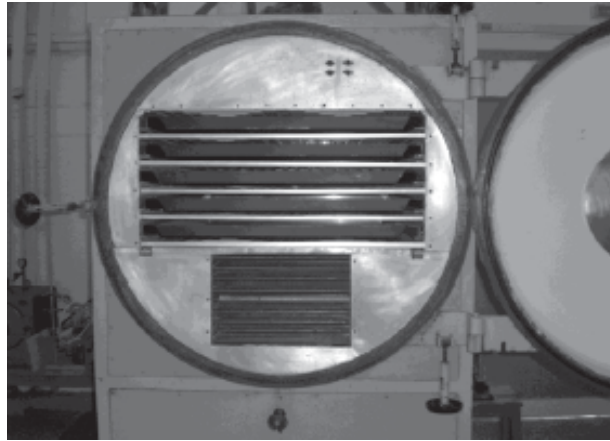


(Sumber: Mujumdar, 2006)

Gambar 2.2 *Spray Dryer*

3. *Freeze dryer*

Freeze dryer merupakan suatu alat pengeringan yang termasuk ke dalam *conduction dryer/indirect dryer* karena proses perpindahan terjadi secara tidak langsung, yaitu antara bahan yang akan dikeringkan (bahan basah) dan media pemanas terdapat dinding pembatas sehingga air dalam bahan basah/lembab yang menguap tidak terbawa bersama media pemanas. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan panas terjadi secara hantaran (konduksi), sehingga disebut juga *conduction dryer/indirect dryer* (Octaria, 2015). *Freeze dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



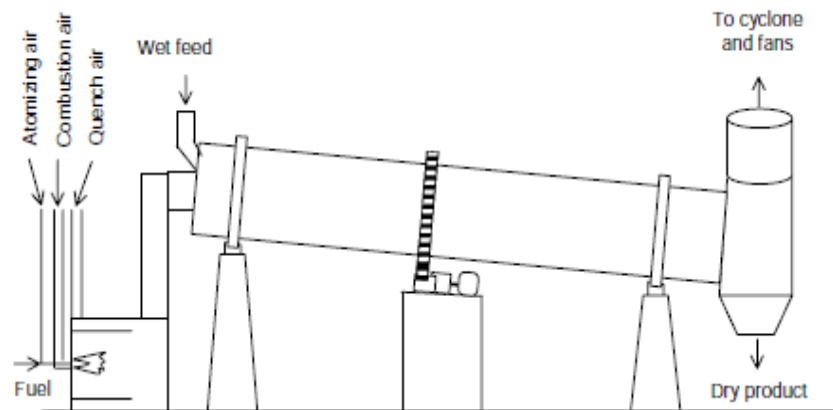
(Sumber: Berk, 2013)

Gambar 2.3 *Freeze Dryer*

Pengeringan beku (*freeze drying*) adalah salah satu metode pengeringan yang mempunyai keunggulan dalam mempertahankan mutu hasil pengeringan, khususnya untuk produk-produk yang sensitif terhadap panas. Adapun prinsip kerja *freeze dryer* meliputi pembekuan larutan, menggranulasikan larutan yang beku tersebut, mengkondisikannya pada vakum *ultra-high* dengan pemanasan pada kondisi sedang, sehingga mengakibatkan air dalam bahan pangan tersebut akan menyublim dan akan menghasilkan produk padat (Octaria, 2015).

4. *Rotary dryer*

Rotary dryer atau bisa disebut *drum dryer* merupakan alat pengering yang berbentuk sebuah drum dan berputar secara kontinyu yang dipanaskan dengan tungku atau gasifier. *Rotary dryer* sudah sangat dikenal luas di kalangan industri karena proses pengeringannya jarang menghadapi kegagalan baik dari segi output kualitas maupun kuantitas. Pengering *rotary dryer* biasa digunakan untuk mengeringkan bahan yang berbentuk bubuk, granula, gumpalan partikel padat dalam ukuran besar (Octaria, 2015). *Rotary dryer* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



(Sumber: Mujumdar, 2006)

Gambar 2.4 *Rotary Dryer*

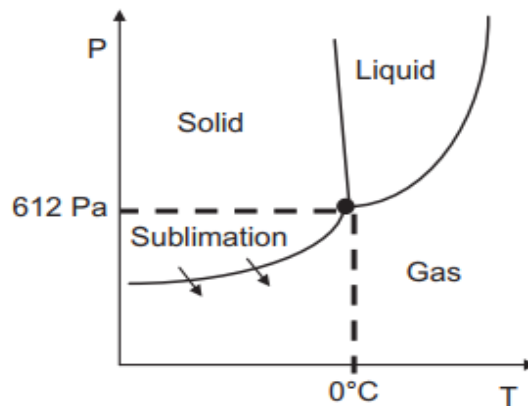
Secara umum, alat *rotary dryer* terdiri dari sebuah silinder yang berputar dan digunakan untuk mengurangi atau meminimalkan cairan kelembaban isi materi dan penanganannya ialah kontak langsung dengan gas panas di dalam ruang pengering. Pada alat pengering *rotary dryer* terjadi dua hal yaitu kontak bahan dengan dinding dan aliran uap panas yang masuk ke dalam drum. Pengeringan yang terjadi akibat kontak bahan dengan dinding disebut konduksi karena panas dialirkan melalui media yang berupa logam. Sedangkan pengeringan yang terjadi akibat kontak bahan dengan aliran uap disebut konveksi karena sumber panas merupakan bentuk aliran. (McCabe dkk, 1993).

2.2 Pengeringan Beku

Pengeringan beku atau liofilisasi adalah penghilangan air melalui sublimasi dari keadaan beku (es). Dalam proses ini, makanan pertama-tama dibekukan dan kemudian dikenakan vakum tinggi, di mana air es menyublim (yaitu, menguap langsung, tanpa pencairan) (Berk, 2013). Keunggulan produk hasil pengeringan beku antara lain adalah dapat mempertahankan stabilitas produk, dapat mempertahankan stabilitas struktur bahan, dapat meningkatkan daya penghilangan air. Pengeringan beku sangat dikenal pada proses liofilisasi produk (Pujiastuti, 2009).

Sublimasi adalah transisi langsung dari kondisi padat ke kondisi gas tanpa meleleh. Sublimasi terjadi pada kisaran suhu dan tekanan tertentu, tergantung pada substansi yang dimaksud. Diagram fase air murni pada Gambar 2.5 menunjukkan

bahwa sublimasi es air hanya dapat terjadi jika tekanan uap dan suhu di bawah triple point air yaitu, di bawah 611,73 Pa dan 0,01 °C (Berk, 2013).



(Sumber: Berk, 2013)

Gambar 2.5 Diagram Fasa Air Murni pada Proses Sublimasi

Sesuai dengan namanya *freeze drying*, kadar air dalam produk terlebih dahulu akan diubah menjadi es yang kemudian es tersebut akan diubah fasenya secara sublimasi pada temperatur dan tekanan dibawah *triple point* dalam diagram fasa air. Penentuan massa dibawah kondisi vakum merupakan hal yang tidak mudah untuk dilakukan. Kondisi batas operasi dari beberapa sensor yang terjadi dan ukurannya pun dapat terpengaruh dari beberapa gangguan, seperti getaran, aliran gas dan gradient temperatur (Pujihastuti, 2009).

Pengeringan beku vakum merupakan salah satu cara terbaik dalam pengeringan produk karena pengeringan beku vakum dapat mengeringkan atau mengawetkan bahan tanpa terjadi perubahan sifat fisik dan kimia bahan. Pengeringan beku vakum dilakukan pada kondisi dibawah titik *triple* air yakni di bawah temperatur 0°C dan tekanan di bawah 610,5 Pa sehingga dalam proses pengeringan beku vakum tidak terjadi perubahan tekstur, rasa, warna, *flavor* dan cita rasa. Hal ini disebabkan karena dalam proses pengeringan beku vakum kandungan yang ada pada produk tidak hilang, melainkan hanya kadar airnya yang hilang (Brama dan Martin, 2014).

Proses pemisahan pada pengeringan beku meliputi tiga tahap: (a) tahap pembekuan, (b) tahap pengeringan beku primer, dan (c) tahap pengeringan beku sekunder. Pada tahap pembekuan, bahan makanan atau larutan didinginkan pada temperatur dimana semua material dalam keadaan beku. Pada tahap pengeringan

beku primer, pelarut yang telah mengalami pembekuan dihilangkan melalui proses sublimasi. Pada tahap pengeringan sekunder melibatkan penghilangan pelarut (air) yang tidak membeku (Mujumdar, 2006).

Perbedaan utama antara pengeringan beku dengan pengeringan biasa/vakum dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbedaan antara Pengeringan Biasa/Vakum dan Pengeringan Beku

Kriteria	Pengeringan Biasa/Vakum	Pengeringan Beku
Suhu Pengeringan	37-93°C	Di bawah titik beku
Mekanisme Pengeringan	Penguapan (evaporasi)	Sublimasi
Tekanan	Tekanan atmosfer – vakum (di atas P triple)	Tekanan vakum (di bawah P triple)
Mutu Produk	Sering menghasilkan permukaan yang keriput, kurang porus, densitas tinggi, kurang mudah dibasahkan (disegarkan) kembali, warna kegelapan, mutu flavor, nilai gizi berkurang	Tidak menyebabkan permukaan yang keriput, lebih porus, densitas lebih rendah, mudah disegarkan kembali, warna normal, mutu flavor dan nilai gizi lebih dapat dipertahankan
Biaya	Lebih murah	Lebih mahal
Kegunaan Umum	Untuk pengeringan umum, cocok untuk sayur-sayuran dan biji-bijian, Kurang/tidak cocok untuk daging dan produk daging	Untuk produk dengan nilai ekonomi cukup tinggi, mikroenkapsulasi, produk instant, cocok untuk daging dan produk daging

(Sumber: Hariyadi, 2009)

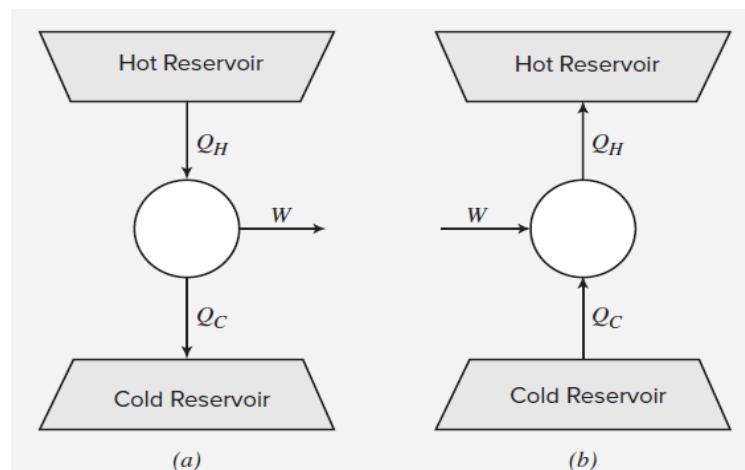
2.3 Termodinamika Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

2.3.1 Siklus Refrigerasi Carnot

Siklus refrigerasi carnot merupakan kebalikan dari mesin carnot. Mesin carnot menerima energi kalor dari temperatur tinggi, energi kemudian diubah menjadi suatu kerja dan sisa energi tersebut dibuang ke sumber panas pada temperatur rendah. Sedangkan siklus refrigerasi carnot menerima energi pada temperatur rendah dan mengeluarkan energi pada temperatur tinggi. Oleh sebab itu pada siklus pendingin diperlukan penambahan kerja dari luar (Hadianto, 2014). Perbedaan mesin Carnot dan refrigerasi Carnot dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Sistem refrigerasi yang umum dan mudah dijumpai pada aplikasi sehari-hari, baik untuk keperluan rumah tangga, komersial, dan industri, adalah sistem refrigerasi kompresi uap (*vapor compression refrigeration*). Pada sistem ini

terdapat refrigeran (refrigeran), yakni suatu senyawa yang dapat berubah fase secara cepat dari uap ke cair dan sebaliknya. Pada saat terjadi perubahan fase dari cair ke uap, refrigeran akan mengambil kalor (panas) dari lingkungan. Sebaliknya, saat berubah fase dari uap ke cair, refrigeran akan membuang kalor (panas) ke lingkungan sekelilingnya (Tampubolon dan Samosir, 2005).



(Sumber: Smith dkk, 2018)

Gambar 2.6 Skema diagram: (a) mesin Carnot; (b) refrigerasi Carnot

2.3.2 Komponen Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Pada mesin pendingin terdapat 4 (empat) komponen utama dan bahan kerja, yaitu kompresor, kondenser, katup ekspansi, evaporator, dan refrigeran.

1. Kompresor

Kompresor dikenal sebagai jantung dari suatu sistem refrigerasi, dan digunakan untuk menghisap dan menaikkan tekanan uap refrigeran yang berasal dari evaporator. Bagian pemipaan yang menghubungkan antara evaporator dengan kompresor dikenal sebagai saluran hisap (*suction line*). Penambahan tekanan uap refrigeran dengan kompresor ini dimaksud agar refrigeran dapat mengembun pada temperatur yang relatif tinggi. Refrigeran yang keluar dari kompresor masih berfasa uap dengan tekanan tinggi. Perbandingan antara absolut tekanan buang (*discharge pressure*) dan tekanan isap (*suction pressure*) disebut dengan ratio kompresi (*compression ratio*). Refrigeran yang masuk kedalam kompresor harus benar-benar berfasa uap. Adanya cairan yang masuk ke kompresor dapat merusak piston, silinder, piston ring dan batang torak. Karena itu, beberapa jenis mesin refrigerasi

dilengkapi dengan *liquid receiver* untuk memastikan refrigeran yang diisap oleh kompresor benar-benar telah berfasa uap (Tampubolon dan Samosir, 2005).

Kompresor pada sistem refrigerasi dapat berupa kompresor torak (*reciprocating compresor*), *rotary*, *scrol*, *screw*, dan *centrifugal*. Kompresor yang paling umum dijumpai dan terdapat dalam berbagai tingkat kapasitas adalah kompresor torak (Tampubolon dan Samosir, 2005).

2. Kondenser

Di dalam sistem refrigerasi kompresi uap, kondenser adalah suatu komponen yang berfungsi untuk merubah fasa refrigeran dari gas bertekanan tinggi menjadi cairan bertekanan tinggi atau dengan kata lain pada kondenser ini terjadi proses kondensasi (Adam, 2012). Dengan demikian, pada kondenser terjadi perubahan fasa uap ke cair ini selalu disertai dengan penbuangan kalor ke lingkungan. Pada kondenser berpendingin udara (*air cooled condenser*), penbuangan kalor dilakukan ke udara. Pada kondenser berpendingin air (*water cooled condenser*), penbuangan kalor dilakukan ke air. Refrigeran yang telah berubah menjadi cair tersebut kemudian dialirkan ke evaporator melalui katup ekspansi (Tampubolon dan Samosir, 2005).

3. Alat Ekspansi

Setelah refrigeran terkondensasi di kondenser, refrigeran cair tersebut masuk ke katup ekspansi yang mengontrol jumlah refrigeran yang masuk ke evaporator agar sesuai dengan laju aliran atau penguapan cairan refrigeran di evaporator. Selain itu, katup ekspansi juga berfungsi menurunkan tekanan hal ini bertujuan untuk menjaga beda tekanan di sisi tekanan rendah dan tekanan tinggi pada sistem (Adam, 2012). Alat ekspansi dapat berupa pipa kapiler, katup ekspansi termostatik (TXV, *thermostatik expansion valve*), katup ekspansi *automatic*, maupun katup ekspansi manual (Tampubolon dan Samosir, 2005).

4. Evaporator

Evaporator adalah alat penukar kalor yang digunakan untuk menyerap kalor dari benda-benda yang akan didinginkan yang berada di dalam ruangan evaporator

dan memindahkan kalor tersebut ke refrigeran. Dengan penyerapan kalor ini, refrigeran akan berubah fasa dari fasa *liquid* saat memasuki evaporator menjadi gas saat keluar dari evaporator (Adam, 2012). Refrigeran pada umumnya memiliki titik didih yang rendah. Sebagai contoh, refrigeran 22 (R22) memiliki titik didih -41°C . Dengan demikian, refrigeran mampu menyerap kalor pada temperatur yang sangat rendah (Tampubolon dan Samosir, 2005).

Evaporator dapat berupa koil telanjang tanpa sirip (*bare pipe coil*), koil bersirip (*finned coil*), pelat (*plate evaporator*) *shell and coil*, atau *shell and tube evaporator*. Jenis evaporator yang digunakan pada suatu sistem refrigerasi tergantung pada jenis aplikasinya (Tampubolon dan Samosir, 2005).

5. Refrigeran

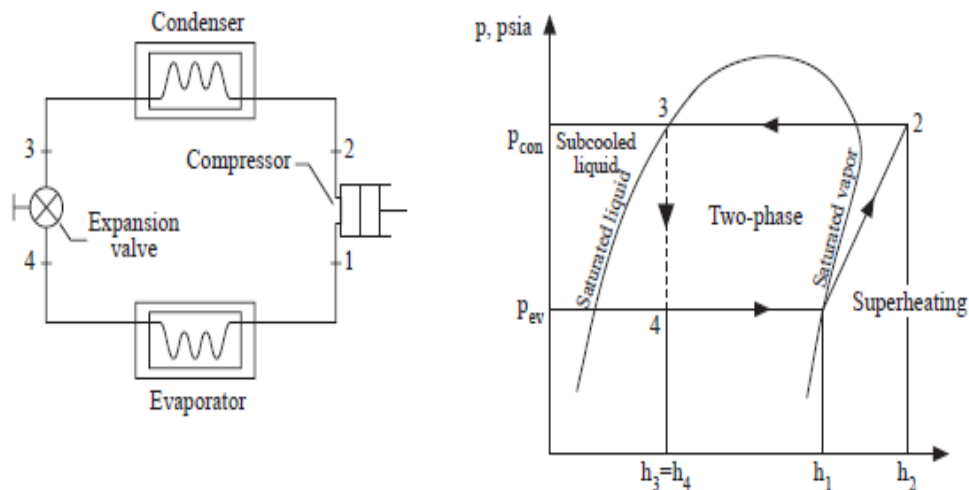
Refrigeran adalah bahan pendingin berupa fluida yang digunakan untuk menyerap kalor melalui perubahan fasa cair ke gas (menguap) dan membuang kalor melalui perubahan fasa gas ke cair (mengkembun). Refrigeran merupakan media utama yang digunakan untuk menyerap dan mentransmisikan panas pada sebuah sistem refrigerasi. Refrigeran menyerap panas pada temperatur dan tekanan yang lebih rendah dan melepas panas pada temperatur dan tekanan yang lebih tinggi (Wang, 2001; Majanasastra, 2015). Refrigeran yang dipakai adalah jenis R22 difluoroklorometana (CHClF_2). Refrigeran R-22 (HCFC) merupakan refrigeran yang banyak digunakan, meskipun telah dijadwalkan untuk dihapuskan pada tahun 2030 (sesuai Protokol Montreal), karena termasuk refrigeran yang berpengaruh terhadap kerusakan/lobang ozon dan pemanasan global (Cappenberg dan Ramadan, 2018).

Sifat-sifat termodinamika refrigeran R22 pada daur kompresi uap dengan suhu evaporator -15°C dan suhu kondenser 30°C adalah sebagai berikut (Singh dan Heldman, 2009).

- | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------|
| a. Tekanan evaporator | : 296,4 kPa |
| b. Tekanan kondenser | : 1203,0 kPa |
| c. Rasio kompresi ($30^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$) | : 5,06 |
| d. Berat molekul | : 86,5 |
| e. Sifat mudah terbakar | : Tidak |

2.3.3 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Standar (Teoritis)

Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan suatu sistem yang memanfaatkan aliran perpindahan kalor melalui refrigeran. Proses utama dari sistem refrigerasi kompresi uap adalah proses kompresi, proses kondensasi, proses ekspansi, dan proses evaporasi. Proses tersebut apabila berlangsung terus - menerus menghasilkan suatu siklus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut.



(Sumber: Wang & Lavan, 1999)

Gambar 2.7 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Standar

Siklus kompresi uap standar merupakan siklus teoritis, dimana pada siklus tersebut mengasumsikan beberapa proses sebagai berikut.

1. Proses Kompresi

Proses 1 - 2 merupakan proses kompresi dimana refrigeran ditekan sehingga tekanannya menjadi lebih tinggi sehingga temperatur jenuhnya menjadi lebih tinggi pada saat masuk kondenser. Hal ini dimaksudkan agar temperatur refrigeran di kondenser menjadi lebih tinggi dari temperatur lingkungan sehingga mampu memindahkan panas ke lingkungan dengan proses kondensasi. Pada siklus ideal proses kompresi ini berlangsung secara *isentropic*. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk kompresor adalah uap jenuh bertekanan rendah setelah dikompresi refrigeran menjadi uap bertekanan tinggi (Adam, 2012).

2. Proses Kondensasi

Proses selanjutnya (proses 2 - 3) merupakan proses kondensasi. Pada proses ini uap refrigeran turun temperaturnya kemudian berubah fasanya pada tekanan dan temperatur yang konstan dari fasa gas ke fasa cair dengan cara membuang kalor ke lingkungan. Kalor refrigeran dapat pindah ke lingkungan karena memiliki temperatur dan tekanan jenuh yang lebih tinggi dari lingkungan. Kalor yang berpindah dari refrigeran ke udara pendingin bergantung pada berbagai faktor, antara lain luas permukaan kondenser, jenis material yang digunakan, selisih temperatur kondensasi dengan temperatur lingkungan. Semakin banyak panas yang dibuang di kondenser, semakin banyak pula refrigeran yang mencair, dan diharapkan saat keluar kondenser seluruhnya menjadi cair (Adam, 2012).

3. Proses Ekspansi

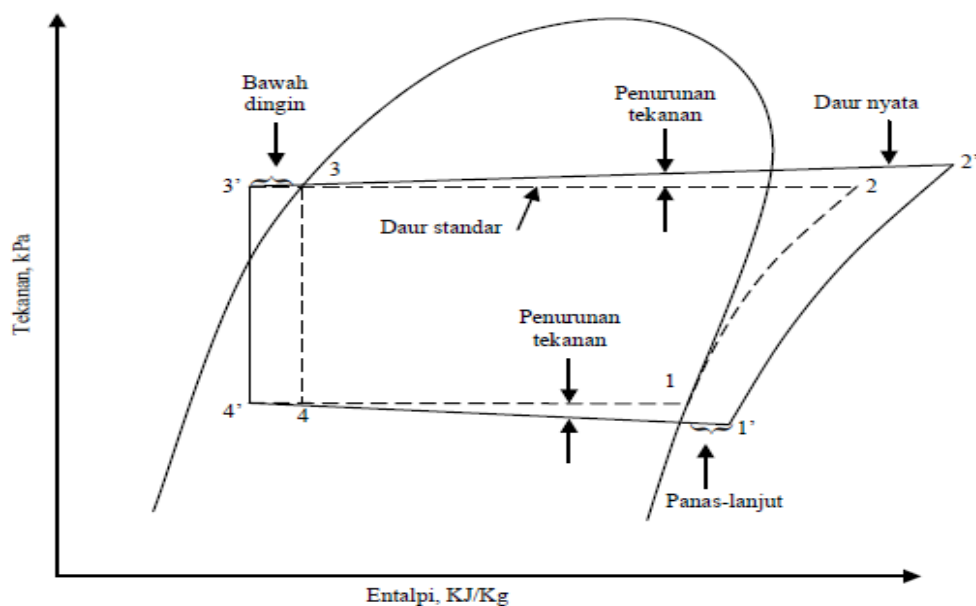
Proses (3 - 4) ini terjadi di pipa kapiler. Setelah refrigeran melepas kalor di kondenser, refrigeran berfasa cair akan mengalir menuju pipa kapiler untuk diturunkan tekanan dan temperaturnya. Diharapkan temperatur yang terjadi lebih rendah daripada temperatur lingkungan, sehingga dapat menyerap kalor pada saat berada di evaporator. Dalam proses ekspansi ini tidak terjadi proses penerimaan atau pelepasan energi (*enthalpy* konstan) (Adam, 2012).

4. Proses Evaporasi

Setelah keluar dari alat ekspansi kemudian refrigeran yang berfasa campuran dialirkan ke evaporator. Pada kondisi ini refrigeran memiliki tekanan yang rendah, sehingga temperatur jenuhnya berada di bawah temperatur ruangan, lingkungan atau produk yang didinginkan. Kalor kemudian terserap oleh refrigeran kemudian refrigeran berubah fasanya menjadi gas sementara temperatur ruangan, kabin, atau produk yang didinginkan menjadi lebih dingin. Proses evaporasi pada siklus ideal terjadi secara *isothermal* dan *isobar* (Adam, 2012).

2.3.4 Siklus Refrigerasi Kompresi Uap Aktual

Siklus kompresi uap yang sebenarnya (aktual) berbeda dari siklus standar (teoritis). Perbedaan ini muncul karena asumsi-asumsi yang ditetapkan dalam siklus standar. Pada siklus aktual terjadi pemanasan lanjut uap refrigeran yang meninggalkan evaporator sebelum masuk ke kondensor. Pemanasan lanjut ini terjadi akibat tipe peralatan ekspansi yang di gunakan atau dapat juga karena penyerapan panas dijalur masuk (*suction line*) antara evaporator dan kompresor. Demikian juga pada refrigeran cair mengalami pendinginan lanjut atau bawah dingin sebelum masuk katup ekspansi atau pipa kapiler. Keadaan diatas adalah peristiwa normal dan melakukan fungsi yang diinginkan untuk menjamin bahwa seluruh refrigeran yang memasuki kompresor atau alat ekspansi dalam keadaan 100% uap atau cair (Utomo, 2018). Perbandingan siklus aktual dan siklus standar dapat dilihat pada Gambar 2.8.



(Sumber: Wang & Lavan, 1999)

Gambar 2.8 Perbandingan Siklus Aktual dan Siklus Standar

Perbedaan yang penting antara daur nyata (aktual) dan standar terletak pada penurunan tekanan dalam kondensor dan evaporator. Daur standar dianggap tidak mengalami penurunan tekanan pada kondensor dan evaporator, tetapi pada daur nyata terjadi penurunan tekanan karena adanya gesekan antara refrigeran dengan

dinding pipa. Akibat dari penurunan tekanan ini, kompresor pada titik 1 dan 2 memerlukan lebih banyak kerja dibandingkan dengan daur standar (Utomo, 2018).

Garis 4-1' diperlihatkan penurunan tekanan yang terjadi pada refrigeran pada saat melewati *suction line* dari evaporator ke kompresor. Garis 1-1' diperlihatkan terjadinya panas lanjut pada uap refrigeran yang ditunjukkan dengan garis yang melewati garis uap jenuh. Proses 1'-2' adalah proses kompresi uap refrigeran didalam kompresor. Pada siklus teoritis proses kompresi diasumsikan isentropic, yang berarti tidak ada perpindahan kalor diantara refrigeran dan dinding silinder. Pada kenyataannya proses yang terjadi bukan isentropic maupun politropic. Garis 2'-3 menunjukkan adanya penurunan tekanan yang terjadi pada pipa-pipa kondensor. Sedangkan pada garis 3-3' menunjukkan tekanan yang terjadi dijalur cair (Utomo, 2018).

2.4 Analisis Termodinamika Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

2.4.1 Persamaan Energi Aliran Steady

Dalam sistem refregerasi, laju aliran massa dianggap tetap. Keseimbangan energi menyatakan bahwa besarnya energi yang masuk dititik 1 ditambah besarnya energi yang ditambahkan berupa kalor, dikurangi dengan energi yang keluar dalam bentuk kerja yang meninggalkan sistem pada titik 2 sama dengan besarnya perubahan energi didalam volume kendali (Stoecker, 2005; Majanasastra, 2015).

Persamaan energi untuk sistem diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{m} \left[h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right] + \dot{q} - \dot{m} \left[h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right] - \dot{W} = \frac{dE}{d\theta}$$

Dimana: \dot{m}	= laju aliran massa (kg/s)
z	= ketinggian (m)
E	= Energi sistem (kJ)
h	= Entalpi (kJ/kg)
g	= percepatan gravitasi (m/s ²)
\dot{W}	= laju aliran energi dalam bentuk kalor (kJ/s)
v	= kecepatan (m/s)

Oleh karena aliran *steady* tidak ada perubahan laju aliran massa pada sistem, maka laju aliran massa yang masuk pada titik 1 sama dengan laju aliran massa yang keluar pada titik 2. Demikian pula tidak ada perubahan harga energi sistem terhadap waktu, sehingga $dE/d\theta = 0$. Persamaan energi aliran *steady* menjadi (Stoecker, 2005; Majanasastra, 2015).

$$\dot{m} \left[h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right] + q = \dot{m} \left[h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right] + W$$

2.4.2 Laju Penyerapan Kalor di Evaporator

Pada saat refrigeran melewati evaporator, terjadi penyerapan kalor dari ruangan yang diinginkan sehingga menghasilkan penguapan refrigeran. Pada proses evaporasi dan kondensasi perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan sehingga harga $(v_2)^2$ dan gz pada titik 1 dan 2 dianggap nol. Karena pada evaporator dan kondenser tidak ada kerja yang dilakukan maka $W = 0$. Kalor yang diserap oleh evaporator dapat dihitung dengan rumus (Stoecker, 2005; Majanasastra, 2015).:

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

$$q_{rf} = h_1 - h_4$$

Dimana,

Q_e = Kalor yang diserap oleh evaporator (kW)

h_4 = Entalpi spesifik refrigeran masuk katup ekspansi (kJ/kg)

h_1 = Entalpi spesifik refrigeran keluar evaporator (kJ/kg)

\dot{m} = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

q_{rf} = Efek refrigerasi (kJ/kg)

2.4.3 Laju Pelepasan Kalor di Kondenser

Pada saat refrigeran melewati kondenser, terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan yang lebih dingin sehingga menghasilkan pengembunan refrigeran. Laju aliran kalor pada proses kondensasi ini dinyatakan pada persamaan berikut ini (Moran & Shapiro, 2004).

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

Dimana,

Q_c = Besarnya kalor yang dibuang di kondenser (kW)

h_2 = Entalpi spesifik refrigeran masuk kondenser (kJ/kg)

h_3 = Entalpi spesifik refrigeran keluar kondenser (kJ/kg)

\dot{m} = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

2.4.4 Daya Kompresor

Kerja kompresi/kebutuhan daya kompresor pada siklus ideal merupakan hasil kali laju aliran massa dengan kenaikan entalpi selama proses kompresi isentropik (Stoecker, 2005). Proses kompresi dianggap berlangsung secara adiabatik yang artinya tidak ada kalor yang dipindahkan baik masuk maupun keluar sistem. Dengan demikian harga $d\theta = 0$. Perubahan energi kinetik dan potensial juga diabaikan, sehingga kerja kompresi dirumuskan sebagai berikut (Moran & Sapiro, 2004).

$$W = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Sedangkan besarnya kerja persatuan massa refrigeran yang dikompresikan adalah:

$$q_w = h_2 - h_1$$

Dimana,

W = Daya atau kerja kompresor yang dilakukan (kW)

h_1 = Entalpi spesifik refrigeran masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = Entalpi spesifik refrigeran keluar kompresor (kJ/kg)

\dot{m} = Laju aliran refrigeran pada sistem (kg/s)

q_w = Besarnya kinerja kompresi yang dilakukan (kJ/kg)

2.4.5 Coefficient of Performance (COP)

Kinerja siklus refrigerasi biasanya dinyatakan dalam bentuk *Coefficient of Performance* (COP). *Coefficient of Performance* (COP) didefinisikan sebagai pemanfaatan dari siklus (jumlah panas yang dihilangkan) dibagi dengan energi yang dibutuhkan input untuk mengoperasikan siklus (ASHRAE, 2001). Koefisien kinerja mesin pendingin adalah rasio energi yang dihilangkan di evaporator (efek refrigerasi) terhadap energi yang disuplai ke kompresor (Jones, 2001).

$$COP_{ref} = \frac{q_{rf}}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Karena ada kerugian mekanis dan termal pada siklus nyata, koefisien kinerja (COP) akan selalu kurang dari COP Carnot ideal (Trott dan Welch, 2000). Karena koefisien kinerja adalah energi yang diterima di evaporator dibagi dengan energi yang dipasok ke mesin, sehingga persamaan untuk siklus Carnot adalah (Jones, 2001):

$$COP_{carnot} = \frac{T_e}{T_c - T_e}$$

$$\eta_{ref} = \frac{COP_{ref}}{COP_{carnot}} \times 100\%$$

Dimana,

COP_{carnot} = COP carnot/ideal

COP_{ref} = COP refrigerasi/aktual

η_{ref} = Efisiensi refrigerasi (%)

q_{rf} = Efek refrigerasi (kJ/kg)

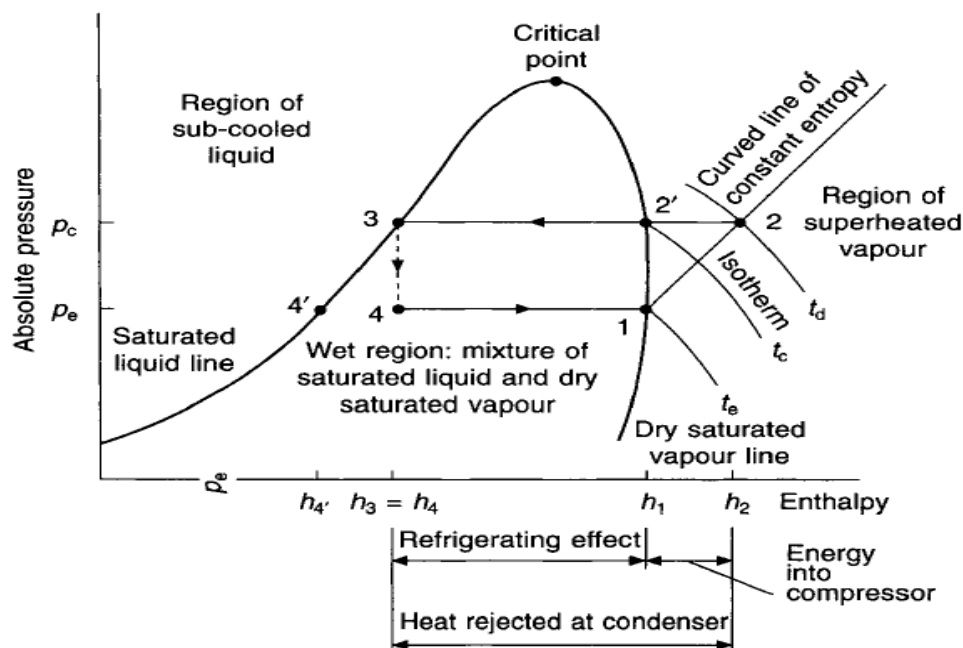
W = Daya kompresor (kJ/kg)

T_c = Temperatur kondenser (K)

T_e = Temperatur evaporator (K)

2.4.6 Diagram Tekanan-Entalpi

Diagram tekanan-entalpi P-h adalah alat yang paling umum digunakan untuk analisis dan perhitungan perpindahan panas dan kerja serta kinerja siklus refrigerasi. Siklus refrigerasi *single-stage* terdiri dari dua daerah: daerah tekanan tinggi atau sisi tinggi, dan daerah tekanan rendah atau sisi rendah. Perubahan tekanan dapat diilustrasikan dengan jelas pada diagram P-h. Selain itu, transfer panas dan kerja dari berbagai proses dapat dihitung sebagai perubahan entalpi yang ditampilkan pada diagram P-H (Wang, 2001). Gambar 2.9 menunjukkan Diagram P-h sederhana pada siklus refrigerasi kompresi uap.



(Sumber: Jones, 2001)

Gambar 2.9 Diagram P-h Sederhana pada Siklus Refrigerasi Kompresi Uap

2.5 Cabai Merah

Cabai merah (*Capsicum annuum* L.) termasuk salah satu komoditi sayuran yang mempunyai nilai ekonomi yang cukup tinggi, karena peranannya yang cukup besar untuk memenuhi kebutuhan domestik sebagai komoditi ekspor dan industri pangan maupun industri obat-obatan. Buah yang masih muda berwarna hijau banyak digunakan sebagai sayur dan setelah tua berubah menjadi merah digunakan sebagai bumbu masakan, acar, sambal, macam-macam saus, buah kering dan tepung. Setelah dipanen cabai masih mengalami proses kehidupan, yaitu proses pernapasan yang secara alami tidak dihentikan, mudah mengalami perubahan metabolisme karena kandungan airnya yang tinggi, sehingga tidak dapat lama disimpan dalam bentuk segar (Hartuti dan Sinaga, 1997).

Pengeringan adalah cara penanganan pasca panen yang umum untuk cabai merah. Mengeringkan cabai ada dua cara, yaitu dengan bantuan sinar matahari atau dengan alat pengering. Pengeringan dengan bantuan sinar matahari disebut juga cara alamiah karena sepenuhnya bergantung pada panas matahari, sedangkan pengeringan dengan alat pengering sumber panasnya sepenuhnya diperoleh dari panas buatan. Cara buatan terdiri dari dua cara sesuai dengan jenis alat yang

digunakan, yaitu dengan alat modern dan dengan alat sederhana. Dengan alat modern akan lebih memudahkan dalam pengoperasiannya, sedangkan dengan alat sederhana menuntut kita ikut campur tangan menangani perlakuan pengeringan (Setiadi, 1999). Standar mutu cabai kering menurut SNI 01-3389-1994 ditunjukkan pada Tabel 2.2.

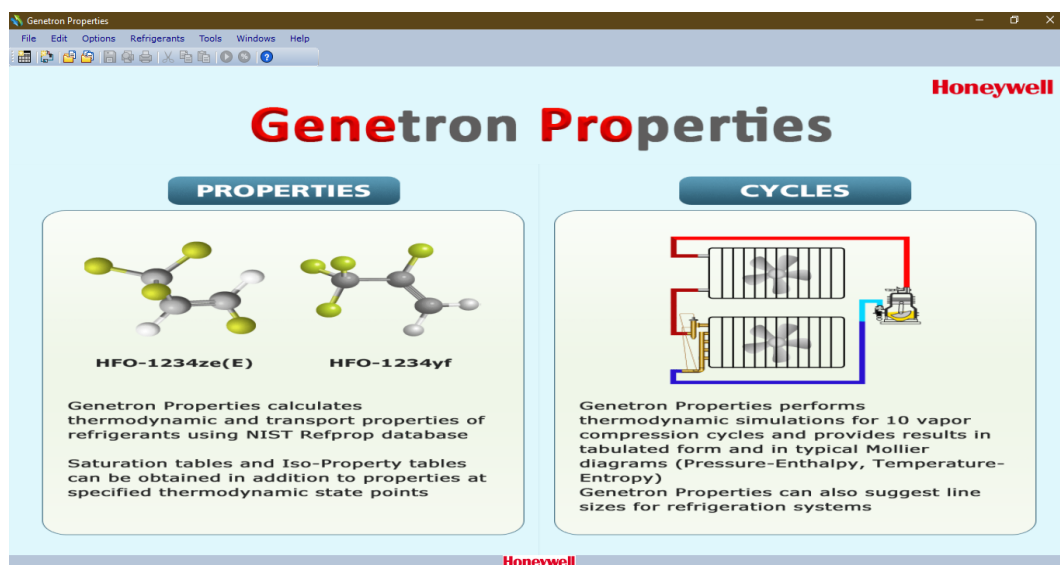
Tabel 2.2 Standar Mutu Cabai Kering menurut SNI No. 01-3389-1994

No.	Jenis Uji	Satuan	Persyaratan	
			Mutu I	Mutu II
1.	Bau dan rasa		Khas	Khas
2.	Berjamur dan berserangga (b/b)	%	Tidak ada	Maks 3
3.	Excreta	mg/kg	Maks 2	Maks 3
4.	Kada air (%)	%	Maks 11	Maks 11
5.	Benda asing (b/b)	%	Maks 1	Maks 3
6.	Buah cacat (b/b)	%	Maks 5	Maks 5

(Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 1994)

2.6 Genetron Properties

Genetron Properties adalah sebuah software simulasi yang dapat menghitung aliran fluida atau refrigeran pada mesin pendingin. Genetron Properties melakukan simulasi termodinamika untuk siklus kompresi uap dan memberikan hasil dalam bentuk tabulasi dan pada sifat Mollier diagram (T- s) (Cappenberg dan Ramadan, 2018). Tampilan halaman awal pada Genetron Properties dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tampilan Halaman Awal pada Genetron Properties